

## Title of the Invention

# OPTICAL FIBER FOR WDM SYSTEM AND MANUFACTURING METHOD THEREOF

## Background of the Invention

### 1. Field of the Invention

本発明は波長分割多重光伝送（WDM）に用いる光ファイバ、特にメトロポリタン系光ファイバおよびその製造方法に関する。

### 2. Description of Related Art

従来より、光ファイバを用いた光伝送における伝送容量を増大させる技術の検討が盛んに行われている。

一般に、光ファイバの伝送損失は波長 1550 nm 付近で最も小さくなるため、この波長帯を用いた光伝送を行うことが望まれ、波長 1550 nm 付近にゼロ分散波長を有する分散シフト光ファイバ（DSF）が開発された。この光ファイバにより、波長 1.55  $\mu$ m 帯において伝送容量が数 Gbps の光伝送が可能となった。

また、近年では、伝送容量を増大させるための技術として波長分割多重（WDM）光伝送についての研究開発がきわめて盛んに行われている。そして、WDM 光伝送に好適に用いられる光ファイバについても多くの検討がなされている。

光ファイバを WDM 光伝送に使用する場合には、使用波長帯にゼロ分散波長が存在しないことが四光波混合を防ぐ観点から要求されるため、使用波長帯に零分散をもたないノンゼロ分散シフト光ファイバ（NZDSF）が開発された。この NZDSF の開発により、波長 1530 nm～1565 nm の波長領域（Cバンド）および波長 1565 nm～1625 nm の波長領域（Lバンド）での WDM 伝送が可能となり、伝送容量は飛躍的に増大した。

このような WDM 伝送システムにおいて、さらに、伝送容量を拡大するために、信号光の波長帯域の幅を広げる試みがなされている。

米国特許 6205268 号に開示されている発明では、図 13 の損失曲線 13

2と分散曲線131のように、標準シングルモード光ファイバとほぼ同様のファイバパラメータを維持しながら、1383nmのOH吸収による損失ピーク（図13の133）を低減させ、かつ、1.4 $\mu$ m帯の分散値を低減させることにより、1.3 $\mu$ m帯、1.4 $\mu$ m帯、1.5 $\mu$ m帯の幅広い波長領域でのCWDM（Coarse Wavelength Division Multiplexing）システムを実現している。このCWDM伝送システムにおいては、光ファイバは1310nm近傍にゼロ分散波長を有するため（分散曲線131）、1.3 $\mu$ m帯は、アナログCATV伝送に使用し、1.4 $\mu$ m帯で10Gbps以上の伝送が提案されている。また、この新しいCWDM伝送方式の提案により、1.4 $\mu$ m帯でのDWDM（Dense Wavelength Division Multiplexing）伝送に不可欠な伝送装置も近年開発され、実用化されつつある。

WDM伝送のメトロポリタン系への適用を考慮した場合、今日、布設されている伝送路の圧倒的多数が標準シングルモードファイバであることを考えれば、上記米国特許6205268号の提案は優れていると思われる。しかしながら、すでに実用化されている伝送装置の圧倒的多数もまた、1.3 $\mu$ m帯伝送用装置であることを考えれば、WDM伝送用に、1.4 $\mu$ m帯のみならず1.3 $\mu$ m帯も使用することが、コスト的、また現用のシステムとの整合性の面からも望ましい。

一方、米国特許第5905838号に開示されている発明として、図13の分散曲線134のように、ゼロ分散波長を1350～1450nmにシフトさせ、1310nmと1550nmの分散の絶対値を1.0～8.0ps/nm/kmとすることで、両波長帯でのWDM伝送を実現する光ファイバが提案されている。しかしながら、両波長帯でのWDM伝送を実現させようとする、上記米国特許にも記載されているように、モードフィールド径MFD（又はコア実効面積Aeff）を小さくせざるをえなかった。上記米国特許では、Aeffが49 $\mu$ m<sup>2</sup>が上限とされている。

また、米国特許第6131415号では、コアロッドにおけるクラッド／コア比を2.0～7.5とすることで、オーバークラッドの中のOH基が、線引き中にコア内に拡散することを防止し、低OHのファイバが実現している。しかしながら、OH基による吸収ピークは一般にIEC60793-2-50（first

edition 2002-01) Annex C Section C 3.1で規定する水素エージング試験を行うと増加することが知られている。

特に、メトロポリタン系での適用を考慮した場合、以下の要件が更に要求される。

(1) すでに、標準のシングルモード光ファイバが多く敷設されており、これら既設の光ファイバとの整合性が重要である。このため、MFDやクラッド径、比屈折率差等のファイバパラメータや、光伝送損失、分散、カットオフ波長等の伝送特性、曲げや側圧等の機械特性は、標準のシングルモードファイバと同一となるように設計することが望ましい。

(2) 光ファイバは、一般に、ケーブル化され、地下の管路内に敷設されるが、メトロポリタン系では、管路が複雑に錯綜しており、長尺敷設が難しい。このため、ケーブルのピース長は平均1 km程度となっている。一方、光ファイバは、通常、25～50 kmのピース長で出荷されている。通常、1383 nmのOHによる吸収損失特性は、ケーブル化によって変化することはないため、ケーブルとして品質を保証するためには、光ファイバの伝送特性の長手方向の均一性が重要となる。

メトロポリタン系においては、1000心程度の多心ケーブルが実用化されており、伝送損失よりも、1 km程度での特性（伝送損失）の均一性、ファイバ間の接続での損失が小さいこと、曲げ損失が小さいこと、側圧に強いこと等の取り扱い性に優れた光ファイバであることの方が重要となる。こうした観点からみれば、上記米国特許第5905838号で提案されている光ファイバでは、必ずしも短尺でのファイバの特性の均一性が保証されておらず、MFD ( $A_{eff}$ ) が  $7 \mu\text{m}$  程度と小さいためMFDが  $9.2 \mu\text{m}$  程度の標準シングルモード光ファイバとの接続では、接続損失が0.3 dB以上となり、実用的ではない。このように、既存の伝送路との完全な整合を図ろうとすると、伝送装置の面で不整合が生じ、反対に既存の伝送装置との完全な整合を図ろうとすれば、伝送路の面で不整合が生じている。この整合性について、伝送路・伝送装置の両面から、最適化しようとする試みは、これまでのところ実施されていない。

## Summary of the Invention

本発明は、1 km程の短尺ファイバの1383 nmにおける伝送損失の長手均一性と、主に、メトロポリタン・光ファイバとして既設の光ファイバとの整合性に着目してなされた。

われわれは、OHの吸収ピークである波長1383 nmの伝送損失の長手均一性に着目し、測定技術の開発とともに、標準のシングルモード光ファイバについて、この波長1383 nm帯の伝送損失の長手均一性を調査した結果、以下の点を発見した。

例えば、25.2 km長の光ファイバにおいて、波長1383 nmの平均伝送損失が0.32 dB/kmであり、OHの吸収ピークがほとんど見られない光ファイバにおいても、1 km毎の区間損失を測定してみると、0.28~0.38 dB/kmと大きく変動していることがわかった(図3を参照)。この光ファイバを波長1310 nmおよび波長1550 nmの伝送損失の長手均一性を測定したところ、1 km毎の区間損失は、平均伝送損失からの変動幅は0.03 dB/km以下におさまっていた。このため、従来の光ファイバでは、波長1310 nm  $\mu$ mや1550 nmにおいて、短尺の伝送損失が保証できていたが、波長1383 nmでは必ずしも保証されていないことが判明した。

注：(Kato's note:図3の ISL 値、IN\_ISL、EX\_ISL、平均 ISL の用語の説明を加えて下さい。)

\* 図は国内版の【図4】を使用し、縦軸「区間損失」単位 (dB)、横軸「条長」単位 (km) として下さい。

また、この波長1383 nm帯の伝送損失の長手変動は、Aeff 拡大型の NZDSF や分散スロープ低減型の NZDSF のように、光ファイバのプロファイルが複雑になればなるほど、大きくなる傾向にあることも併せて判明した。

本発明の第1の側面 (aspect) は、上述の波長1383 nmの伝送損失の長手方向の変動を低減したファイバを提供することである。この発明にかかる光ファイバは、波長1383 nm帯の平均伝送損失が波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さく、1 km以上の長さの光ファイバにおいて、波長1383 nmにお

ける任意の1 kmの区間損失の最大値が、平均伝送損失よりも0.03 dB/km以上大きくないことを特徴とする。波長1383 nm帯における任意の1 km毎の区間損失の最大値が、平均伝送損失よりも0.01 dB/km以上大きくないことが好適である。

また、この発明にかかる光ファイバは、22 m長におけるカットオフ波長が1380 nm未満であることを特徴とする。

さらに、この発明にかかる光ファイバは、水素エージング試験後の波長1383 nmの平均伝送損失が波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さいことを特徴とする。

この発明の光ファイバによれば、波長1383 nmの平均伝送損失が波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さく、波長1383 nmにおける任意の1 kmの区間損失の最大値が、平均伝送損失よりも0.03 dB/km以上大きくないため、1.38  $\mu$ m帯での使用が可能となり、短尺のケーブルの場合でも、伝送損失の保証が可能である。

また22 m長におけるカットオフ長が1380 nm未満であるため、波長1383 nmでのシングルモード伝送が可能である。

さらに、水素エージング試験後の波長1383 nm帯の平均伝送損失が波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さいので、波長1.38  $\mu$ m帯での長期間の安定した伝送が保証される。

なお、この明細書において、平均伝送損失とは、光ファイバ1連続長（つまり、接続箇所を含まない、例えば、1巻きの長さ）に対し、伝送損失（dB）を該1連続長さ（km）で割った値である。また、任意の1 kmの区間損失とは、光ファイバ1連続長に対し、長手方向に、任意の1 kmにおける伝送損失をいう。さらに、水素エージング試験とは、IEC 60793-2-50（first edition 2002-01）C3.1で規定された方法をいう。ここで、本発明において $\lambda_y$ は1383 nmとする。また、22 m長におけるカットオフ波長とは、ITU-T G.650で定義されるケーブルカットオフ波長 $\lambda_{cc}$ を指す。その他、本文で特に定義されない用語については、ITU-T G.650の定義、測定方法に従うものとする。

本発明の第2の側面は、 $1.3\mu\text{m}$ 帯のDWDM伝送に好適で、既設の伝送路（標準シングルモードファイバ）との整合性を有する光ファイバを提供することにある。

本発明の光ファイバは、波長 $1310\text{nm}$ におけるMFDが $8\mu\text{m}$ 以上で、 $1280\sim 1324\text{nm}$ の波長領域にゼロ分散波長をもたず、該波長領域における分散の絶対値が $0.1\sim 8.0\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ で、分散スロープが $0.1\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下であり、22m法におけるカットオフ波長が $1270\text{nm}$ 以下であり、波長 $1310\text{nm}$ における平均伝送損失が $0.4\text{dB}/\text{km}$ 以下であることを特徴としている。ここで、 $1.3\mu\text{m}$ 帯とは、波長 $1280\text{nm}\sim 1324\text{nm}$ の範囲を指す。

$1310\text{nm}$ におけるMFDが $8\mu\text{m}$ 以上であるため、MFDが $9.2\mu\text{m}$ 程度の標準シングルモード光ファイバとの接続損失を $0.1\text{dB}$ 以下にすることが可能となり、既設の伝送路との整合性を保つことが可能となる。

また、波長 $1280\text{nm}\sim 1324\text{nm}$ の波長領域にゼロ分散波長をもたず、該波長領域における分散が $0.1\sim 8.0\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ であるため、四光波混合等の非線形現象による波形の歪が実用上無視できる。分散スロープの絶対値が $0.1\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下であるため、各信号光間での波長分散値の差が小さくなり、各信号光間の波長分散による波形歪量の差を効果的に低減した光伝送が可能となる。

22m法によるカットオフ波長が $1270\text{nm}$ 以下であるため、波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯において基底モード光のみが伝搬し得る。波長 $1310\text{nm}$ における平均伝送損失が $0.4\text{dB}/\text{km}$ 以下であるため、波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯における光通信が可能である。

また、本発明の光ファイバは、 $1310\text{nm}$ におけるMFDが $9.5\mu\text{m}$ 以下である場合や、ゼロ分散波長が $1325\sim 1350\text{nm}$ である場合には、標準シングルモード光ファイバのプロファイルに最小限の変更を加えるだけで実現可能となり、製造性に優れた光ファイバが実現可能となる。

また、本発明の光ファイバでは、 $1310\text{nm}$ におけるMFDを $A(\mu\text{m})$ 、22m法におけるカットオフ波長を $B(\text{nm})$ とした場合に、 $A\times B\leq 11\times 10$

00の関係を満足させることで上記特性が実現できる。

さらに、本発明の光ファイバでは、波長1383nmの平均伝送損失が、波長1310nmの平均伝送損失よりも小さく、分散の絶対値が0.1~8.0ps/nm/kmであり、分散スロープを0.1ps/nm<sup>2</sup>/km以下とすることにより、将来の波長領域拡大の際に、1.4μm帯を活用することができ、好適である。

水素エージング試験前後での波長1383nmにおける平均伝送損失の増加が0.04dB/km以下であることにより、耐水素性を加味した長期信頼性に優れた光ファイバを提供できることになる。

本発明の第3の側面は、水素エージング試験を行っても1383nmでのOH基による吸収ピークの増加が少ない、即ち耐水素性に優れ、且つメトロポリタン用のファイバとして既設の光ファイバと整合するファイバを提供することを目的とする。特に、CバンドでのWDM伝送に好適な光ファイバを安価に製造する方法の提供を目的とする。

上記した目的を達成するために、本発明においては、波長1310nmにおけるモードフィールド径が8.0~11.0μmであり、波長1383nmにおける平均伝送損失が波長1310nmにおける平均伝送損失よりも小さく、波長1383nmにおける分散が+2~+8ps/nm/kmである光ファイバを製造する際に、光ファイバ母材を線引きしたのち被覆を施し、得られた光ファイバ素線に対し、重水素ガスを含む気相雰囲気中で曝露処理することを特徴とする光ファイバの製造方法が提供される。

上記した特性を備えた光ファイバであって、その特性が採用される理由は以下のとおりである。

(1) まず、波長1310nmにおけるMFDが8.0~11.0μmとなるように設計されているが、これは、既設の標準シングルモード光ファイバと接続したときの整合性を確保するためである。

(2) 波長1383nmにおける平均伝送損失が波長1310nmにおける平均伝送損失よりも小さくなるように設計されている。そして、波長1383nmにおける伝送損失の増大が抑制されている。

このことは、後述する処理を施すことにより、波長1383nmにおけるOH

基による吸収損失の増加を抑制することによって実現される。

(3) 波長 1 3 8 3 nm の波長領域における分散が  $+2 \sim +8 \text{ ps/nm/km}$  となるように設計されている。好ましくは、波長 1 3 8 3 nm における分散が  $+4 \sim +7 \text{ ps/nm/km}$  となるように設計されている光ファイバになっている。

このことにより、四光波混合の影響を抑制し、かつ光伝送路を構成する際の累積分散の影響を最小限におさえることができる。

なお、本発明で製造される光ファイバは、上記した特性を満たしているならば、屈折率分布プロファイルの形状は何ら制限を受けるものではない。例えば、図 1 で示したような低損失光ファイバに適用されている屈折率分布プロファイルを採用することができる。

#### Brief Description of the Drawing

##### 【図 1】

本発明の第 1 の側面に係る実施例の光ファイバの屈折率プロファイルを示す図である。

##### 【図 2】

本発明の第 1 の側面に係る他の実施例の光ファイバの多層のコアの屈折率プロファイルを示す図である。

##### 【図 3】

従来の光ファイバにおける波長 1 3 8 3 nm での伝送損失の 1 km 毎の区間損失変動を示す説明図である。

##### 【図 4】

本発明の第 2 の側面に係る実施例の光ファイバの屈折率プロファイルを示す図である。

##### 【図 5】

本発明の第 2 の側面に係る他の実施例の光ファイバの屈折率プロファイルを示す図である。

##### 【図 6】

本発明の第 3 の側面に係る実施例の光ファイバの屈折率プロファイルを示す図



である。

【図 7】

線引きされ、OH基が極めて微量にしか存在しない光ファイバの伝送損失スペクトル図の1例である。

【図 8】

光ファイバにD 2 処理を行ったときの伝送損失スペクトル図の1例である。

【図 9】

D 2 処理開始後に伝送損失の変化とD 2 処理時間との関係を示すグラフである。

【図 10】

D 2 処理前の光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。

【図 11】

D 2 処理後の光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。

【図 12】

D 2 処理の前・後における波長 1 4 2 0 nmでの伝送損失の差と、D 2 処理開始後の経過時間との関係を示すグラフである。

【図 13】

従来の光ファイバの分散特性と伝送損失特性を示す図である。

#### Description of the Embodiment

以下に添付図面を参照して、この発明の波長 1 3 8 3 nmにおける伝送損失変動を低下させるという第 1 の側面の光ファイバおよびその製造方法について説明する。図 1 には、本発明に係る光ファイバの屈折率プロファイルが示されている。上述した波長 1 3 8 3 nmにおける伝送損失の長手変動問題について、我々は、鋭意検討した結果、光ファイバの母材段階におけるコア径やコア偏心率が長手に微小変動しているのが原因であることをつきとめた。オーバークラッド中のOH基は、線引きの際に、コアに向かって拡散するが、オーバークラッドに近い方がOH基濃度は高い。モードフィールド径の大きいところは、モードフィールド径の小さいところに比べてOH基濃度の高いオーバークラッド近傍まで光が伝播する領域が広がるため、波長 1 3 8 3 nmの伝送損失が大きくなりやすい。従って、

モードフィールド径の変化に伴って、波長 1383 nm の伝送損失の長手変動が発生することになるからである。

波長 1383 nm の平均伝送損失を低減させるためには、US 特許第 6131415 に記載されている通り、コアロッドにおけるクラッド／コア比を大きくすることが効果があることが示されている。しかしながら、コアロッドにおけるクラッド／コア比を大きくすることは、クラッド／コア比の微小変動が、光ファイバ状態にしたときの、MFD やモードフィールド偏心率の変動する長さが長くなることにつながる。この相反する特性を改善するため、標準シングルモード光ファイバの設計において、以下の変更を行った。

1) VAD 法において、コア製造時のクラッド／コア比を 2 以下とした。これにより、クラッド／コア比の変動が長手方向におよぼす影響を 1 km 以下に抑えることができた。

2) 延伸工程等でも、酸水素火炎バーナを使わずに、電気炉にて延伸した。OH を生成する原因となる酸水素火炎バーナを使用しないことで、ガラス体全体の OH 基濃度を 1 ppm 以下に低減することができた。

3) 図 1 に示すように、コアロッド（コア 11 および第 1 クラッド 12）と最外層の第 3 クラッド 14 の中間に、嵩密度の小さいスートをガラス化して得られる第 2 クラッド 13 の領域を配した。コア 11 と第 2 クラッド 13 の比は 6～8 とした。第 2 クラッド 13 の領域のスート段階における嵩密度は、 $0.3 \text{ g/cm}^3$  以下が望ましい。これにより、第 2 クラッド 13 の領域の OH 基濃度も 1 ppm 以下に低減することができた。

こうして得られた、光ファイバ母材を線引きして、光ファイバにし、特性を確認したところ、以下に示す結果が得られ、短尺のケーブルにおいても、適用可能となった。

伝送損失 at 1310 nm : 0.34dB/km

伝送損失 at 1550 nm : 0.20dB/km

伝送損失 at 1383 nm : 0.31dB/km

1 km の区間損失の最大値 :

at 1310 nm : 0.36dB/km

at 1550 nm : 0.21dB/km

at 1383 nm : 0.32dB/km

MFD :

at 1310 nm : 9.2  $\mu$ m

at 1550 nm : 10.4  $\mu$ m

at 1383 nm : 9.6  $\mu$ m

なお、本手法を、図2のプロファイルに適用し、有効断面積 ( $A_{eff}$ ) 拡大型の NZDSF、分散スロープ低減型の NZDSF を試作した。すなわち、図2に示した屈折率プロファイル21は、図1に示したコア11に対応する多層コアの屈折率プロファイルである。このような多層コアを有する場合であっても、図1に示した第2クラッド13を持たせることによって、波長1383 nmにおける任意の1 km毎の区間損失の最大値が平均伝送損失よりも0.03 dB/km以上となることはないという結果を得た。

この発明にかかる光ファイバによれば、波長1383 nmの平均伝送損失が波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さく、波長1383 nmにおける任意の1 kmの区間損失の最大値が、平均伝送損失よりも0.03 dB/km以上大きくないため、波長1383 nmでの使用が可能となり、短尺のケーブルの場合でも、伝送損失の保証が可能である。更に、水素エージング試験後の波長1383 nmの平均伝送損失が波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さいので、約1380 nm付近での長期間の安定した伝送が保証される。

次に、本発明の既設ファイバの整合性のために1310 nmにおけるMFDが8  $\mu$ m以上とする側面での光ファイバの実施例を図4～図5を参照し説明する。

本発明に係わる光ファイバは、1310 nmにおけるMFDが9.5  $\mu$ m以下である場合や、ゼロ分散波長が1325～1350 nmである場合に、好適となる。上記特性は、波長1310 nmにおけるMFDをA ( $\mu$ m)、22 m法におけるカットオフ波長をB (nm) とした場合に、 $A \times B \leq 11 * 1000$  の関係を満足させることで実現できる。

さらに、本発明に係わる光ファイバは、波長1383 nmの平均伝送損失が、波長1310 nmの平均伝送損失よりも小さく、分散の絶対値が0.1～8.0

$\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ であり、分散スロープが $0.1 \text{ ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下とすることが好適である。

水素エージング試験前後での波長 $1383 \text{ nm}$ における伝送損失の増加が $0.04 \text{ dB}/\text{km}$ 以下とすることにより、長期信頼性に優れた光ファイバを提供でき、好適である。

本実施例に係る光ファイバは、光軸中心に屈折率 $n_1$ を有するコア領域と、コア領域の周囲に屈折率 $n_2$ を有するクラッド領域とを備える。各屈折率の大小関係は、 $n_1 > n_2$ である。このような光ファイバは、シリカをベースとして、例えば、コア領域にGe元素を添加することにより実現することができる。

光ファイバは、VAD法によって製造されたスートを、脱水・焼結によりガラス化し、プリフォームを得た後、線引きし、2層のUV硬化型樹脂を被覆して、外径約 $250 \mu\text{m}$ の光ファイバ素線とした。その後、常温・常圧で $\text{D}_2$ ガス雰囲気内に約2時間放置したあとで、下記に示す各種特性を確認した。

#### 【第1の実施例】

第1の実施例に係る光ファイバは、図4に示すステップ型のコア屈折率 $41$ とクラッド屈折率 $42$ からなる屈折率プロファイルを有しており、波長 $1310 \text{ nm}$ におけるMFDが $8.5 \mu\text{m}$ であり、零分散波長が $1326 \text{ nm}$ であり、 $1280 \text{ nm}$ から $324 \text{ nm}$ の波長領域における分散スロープが $0.08 \text{ ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ であり、該波長領域における分散値の絶対値は $0.4 \sim 3.4 \text{ ps}/\text{nm}/\text{km}$ であり、カットオフ波長が $1250 \text{ nm}$ である。従って、 $A \times B$  (MFDとカットオフ波長の積)は $10600$ である。また、波長 $1310 \text{ nm}$ における平均伝送損失は $0.34 \text{ dB}/\text{km}$ 、波長 $1383 \text{ nm}$ における平均伝送損失は $0.29 \text{ dB}/\text{km}$ であった。また、本ファイバを水素エージング試験を実施したところ、試験前後での波長 $1383 \text{ nm}$ における伝送損失の増加は $0.00 \text{ dB}/\text{km}$ であった。

#### 【第2の実施例】

第1の実施例に係る光ファイバは、図4に示す屈折率プロファイルを有しており、波長 $1310 \text{ nm}$ におけるMFDが $8.1 \mu\text{m}$ であり、零分散波長が零分散波長が $1340$ であり、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯における分散スロープが $0.08 \text{ ps}/\text{n}$

$\text{m}^2/\text{km}$ であり、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯における分散値の絶対値は $1.6\sim 5.2\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ であり、カットオフ波長が $1100\ \text{nm}$ である。従って、 $A\times B$  ( $\text{MFD}$ とカットオフ波長の積)は $8900$ である。また、波長 $1310\ \text{nm}$ における平均伝送損失は $0.34\ \text{dB}/\text{km}$ 、波長 $1383\ \text{nm}$ における平均伝送損失は $0.29\ \text{dB}/\text{km}$ であった。また、本ファイバを水素エージング試験を実施したところ、試験前後での波長 $1383\ \text{nm}$ における伝送損失の増加は $0.00\ \text{dB}/\text{km}$ であった。

### 【第3の実施例】

本発明に係わる光ファイバの屈折率プロファイルは図4に示すものに限定されるものではなく、例えば図5に示すようなものでも可能である。第1コア屈折率 $n_1$ は中央にピークを有し、屈折率においてクラッド屈折率 $n_2$ より $\Delta_1$ だけ大きく、第2コア屈折率 $n_3$ は $\Delta_2$ だけ小さく、第3コア屈折率 $n_4$ は $\Delta_3$ だけ大きいプロファイルである。

本発明のファイバは、既設の伝送路との整合性を保つことができ、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯で、4光波混合の発生を抑制したWDM用光ファイバを提供する。

また、本発明の光ファイバは、波長 $1310\ \text{nm}$ における $\text{MFD}$ が $9.5\ \mu\text{m}$ 以下である場合や、ゼロ分散波長が $1325\sim 1350\ \text{nm}$ である場合には、製造性に優れた光ファイバが実現可能となり、好適である。

さらに、本発明の光ファイバでは、波長 $1383\ \text{nm}$ の平均伝送損失が、波長 $1310\ \text{nm}$ の平均伝送損失よりも小さく、分散の絶対値が $0.1\sim 8.0\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ であり、分散スロープが $0.1\ \text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 以下とすることにより、将来の使用波長領域拡大の際に、 $1.4\ \mu\text{m}$ 帯を活用することができ、好適である。

水素エージング試験前後での波長 $1383\ \text{nm}$ における平均伝送損失の増加が $0.04\ \text{dB}/\text{km}$ 以下の場合には、長期信頼性に優れた光ファイバを提供でき、さらに好適である。

本発明の第3の側面に従う、耐水素性に優れたメトロポリタン用光ファイバの製造方法の実施例は以下の通りである。

まず、従来と同様にして、VAD法で光ファイバ母材を製造する。ついで、そ

の光ファイバ母材を線引きして所定線径の光ファイバを製造し、その後、光ファイバに被覆を施して光ファイバ素線にする。そして、この光ファイバ素線の耐水素性を高める処理が施される。具体的には、この光ファイバ素線を、処理装置の中に収容し、そして装置内を重水素（D<sub>2</sub>）ガスを含む常温・常圧の雰囲気にして所定時間放置しておく。

重水素成分は光ファイバ素線の光ファイバ本体に含浸し、光ファイバ本体内に存在する欠陥に入り込んで結合を形成する。その結果、処理後の光ファイバ素線に水素エージング試験を行った場合、光ファイバ本体内に侵入した水素は、既に不活性状態にある上記欠陥と結合することはできないので、特定の吸収ピークの増加は起こらない。すなわち、耐水素性の向上が実現する。

上記した曝露処理時における常温としては、10～40℃、また常圧としては、86～106 kPaを採用することが好ましい。処理時間は、処理対象の光ファイバ素線の長さで変えることになるが、長くても24時間の処理を行えば充分である。

このような処理を施すことにより、本発明では、上記した特性を備えると同時に、水素エージング試験後の波長1383 nmにおける伝送損失の増加量が0.04 dB/km以下、更には0.01 dB/km以下になる光ファイバを得ることができる。

このようにして製造した光ファイバの屈折率分布プロファイルは図6で示したもので、コア61がクラッド62より高い屈折率のステップ型のものである。

長さが約3 kmであるこの光ファイバ素線を処理装置内に配置し、装置内を温度23℃、圧力100 kPaのほぼ100%重水素雰囲気として、その状態を約3時間保持した。

処理後の光ファイバ素線につき、IEC 60793-2-50（first edition 2002-01）Annex C Section C3.1で規定する水素エージング試験を行い、波長1383 nmにおける平均伝送損失をITU-T G.650で規定する方法で測定した。その結果を、試験前の測定結果とともに表1に示した。なお、波長1310 nmにおける平均伝送損失も測定した。

また、波長1310 nmにおけるMFD、波長1383 nmにおける分散値を

それぞれ測定し、その結果も表 1 に示した。比較のために、重水素曝露処理を施さない光ファイバ素線についても同様の測定を行い、その結果を比較例として併記した。

【表 1】\*表 1 中「図 1」は「図 6」に変更。

	屈折率 分布プ ロファ イル	分散値 (ps/nm/km)	MFD ( $\mu$ m)	波長1310nm における 伝送損失 (dB/km)	波長1383nmにおける伝送 損失 (dB/km)	
					水素エー ジ ング試験前	水素エー ジ ング試験後
実施例 1	図 1	5.8	9.26	0.33	0.31	0.31
実施例 2	図 1	4.5	9.38	0.32	0.29	0.29
比較例	図 1	5.1	9.14	0.33	0.29	0.39

表 1 から明らかなように、重水素処理を施さない比較例と対比して、本発明方法で製造した光ファイバは、水素エージング試験の前後で波長 1383 nm における平均伝送損失の増大は起こっていない。

以上の説明で明らかなように、本発明によれば、光ファイバの製造途中ではなく、既に実使用可能な光ファイバ素線の状態でその耐水素性を向上させることができる。そのため、波長 1383 nm における伝送損失の増加が 0.04 dB/km 以下に抑制され、耐水素性に優れ、長期に亘って伝送損失が安定している光ファイバを安価に製造することができる。

そして、この光ファイバは、波長 1310 nm における MFD が 8.0 ~ 11.0  $\mu$ m、波長 1383 nm における平均伝送損失が波長 1310 nm における平均伝送損失より小さく、かつ波長 1383 nm における分散が +2 ~ +8 ps/nm/km となるように設計されているので、既設の標準シングルモード光ファイバとの整合性も保障されており、光ネットワークの構築にとって有用である。C バンドの WDM 伝送方式で用いる光線路としてその有用性が期待される。

尚、別な問題として線引き後の光ファイバには何らかの構造欠陥が発生している。そしてこの光ファイバを実使用した場合、当該光ファイバの被覆などから発生する H<sub>2</sub> が光ファイバ内に拡散して、前記構造欠陥と相互反応して OH 基を生成することがある。

したがって、仮に製造時には OH 基は存在しなくても、実使用時に新たに OH 基

が発生し、当該光ファイバに吸収損失の生ずることがある。

このようなOH基やH<sub>2</sub>による吸収損失の発生という問題は、光ファイバで長い伝送路を構築する場合、伝送損失の増大を招くので、是非とも解決しなければならない問題としてある。

また、特公平4-4988号公報においては、ガラス中の残留OH基をOD基（Dは重水素）で置換することにより、光の吸収波長を1550nm帯域よりも長波長側に移動させた光ファイバが提案されている。しかしながら、この方法は、実際問題として、残留OH基をOD基に置換させるために、長時間または高温下での処理が必要であり、経済的ではなく実用性に欠けている。

そして、特開2000-187733号公報においては、次のような方法が開示されている。この方法は、線引き後の光ファイバを、その実使用に先立ち、重水素（D<sub>2</sub>）雰囲気曝露することにより、線引き後の構造欠陥が使用環境中のH<sub>2</sub>との間でOH基を生成する以前の段階で、当該構造欠陥にOD基を生成させる方法である。このことにより、光ファイバの構造欠陥と使用環境中のH<sub>2</sub>との相互反応は起こらなくなり、新たにOH基が生成するということは起こらなくなる。

この先行技術の開発により、波長1240nmにおけるH<sub>2</sub>分子に基づく光吸収や、波長1400nm帯域におけるOH基に基づく光吸収は抑制されるようになってきた。ところで、線引き後の光ファイバを重水素（D<sub>2</sub>）雰囲気曝露すると、D<sub>2</sub>分子はガラスの中に拡散する。そして、ガラス中の構造欠陥との相互反応で生成したOD基による吸収損失が、1550nm帯域よりも長波長側で発生する。同時に、遊離のD<sub>2</sub>分子それ自体による吸収損失が波長1420nm付近に発生する。そして、このD<sub>2</sub>分子による吸収損失は小さいとはいえ、見掛け上、光ファイバの伝送損失を増大させることになる。

このことは次のような問題を引き起こす。まず、前記したように、OH基吸収は1400nm帯域で発生する。したがって、重水素処理（以後、D<sub>2</sub>処理という）を行うことにより1400nm帯域におけるOH基吸収は解消したはずであるにもかかわらず、現実には、D<sub>2</sub>処理後の光ファイバには上記した伝送損失の増大が観察されるのであるから、観察者は、この光ファイバにはOH基が存在していると判断することがある。



その結果として、極めて高価なD<sub>2</sub>を用いて更なるD<sub>2</sub>処理を継続することがある。このことは、実際にはD<sub>2</sub>処理によって構造欠陥には全てOD基が生成している、すなわち、D<sub>2</sub>処理の本来の目的は既に達成されているにもかかわらず、上記したD<sub>2</sub>分子の吸収損失に基づく伝送損失の増大という現象を、OH基が存在していることによるOH基吸収に基づくものと誤認していることである。それは、とりもなおさず、D<sub>2</sub>処理の適正な終了時点を決める基準が確立していないからである。

従って上記した問題を解決し、D<sub>2</sub>処理後のD<sub>2</sub>分子による光吸収挙動に関する新たな知見に基づき、D<sub>2</sub>処理の適正な終了時点を決めた光ファイバの製造方法が提供されるべきである。

本発明においては、線引き後の光ファイバに重水素処理を行う工程を含む光ファイバの製造方法において、重水素処理前における前記光ファイバの、波長1383nmにおける平均伝送損失と波長1420nmにおける平均伝送損失との差と、重水素処理後における前記光ファイバの、波長1383nmにおける平均伝送損失と波長1420nmにおける平均伝送損失との差との違いが0.01dB/km以上になった時点をもつことを特徴とする光ファイバの製造方法が提供される。

具体的には、前記重水素処理の開始時点から前記伝送損失の測定時点までに、前記光ファイバを温度25℃で48時間以上の間隔をあける光ファイバの製造方法が提供される。

なお、以後の説明において、「1400nm帯域」とは、波長1335～1435nmにおける任意の1点を指し、「1550nm帯域」とは、波長1500～1600nmにおける任意の1点を指す。また、D<sub>2</sub>処理とは、大気中の濃度より高濃度のD<sub>2</sub>雰囲気中に光ファイバを曝露することをいう。

常法により製造された光ファイバ母材を線引きして得られた光ファイバの伝送損失スペクトル図の1例を図7に示す。

このスペクトル図で、波長1383nm付近に現出しているピークは、OH基に起因する伝送損失であり、この光ファイバは、1400nm帯域と1550nm

m帯域の双方で光伝送が可能な状態になっている。

そして、上記した光ファイバにD<sub>2</sub>処理を行い、D<sub>2</sub>処理開始から72時間経過後における処理光ファイバの伝送損失スペクトル図を図8に示す。

なお、D<sub>2</sub>処理は、密閉容器の中に処理対象の光ファイバを収納し、容器内には所定濃度のD<sub>2</sub>を含む例えばN<sub>2</sub>を封入したのち、所望する時間そのままの状態で放置するという態様で実施される。

図8から明らかなように、波長1420nm付近で新たな伝送損失(A)が認められ、また波長1500nm付近にも新たな伝送損失(B)が認められる。後者は、D<sub>2</sub>処理前の光ファイバにおける構造欠陥に重水素原子Dが結合したOD基による吸収損失の発生に基づくものである。

そして前者は、光ファイバ内に拡散したD<sub>2</sub>分子それ自体の光吸収を原因とする損失の増大である。

そこで、本発明者らは、D<sub>2</sub>処理を開始してからの波長1420nmにおける伝送損失(A)を経時的に測定し、それぞれの時点における測定値からD<sub>2</sub>処理前の伝送損失を減算して、伝送損失の変化量とD<sub>2</sub>処理時間との関係を調べてみた。その結果を図9に示す。

図9から明らかなように、D<sub>2</sub>処理を開始すると同時に伝送損失は、D<sub>2</sub>処理前の値に対して急激に増大し、処理時間72時間経過の時点で最大となる。そして、それ以降は時間経過とともに伝送損失(A)は次第に減少していく。

この新たな知見から次のことを考察することができる。

(1) D<sub>2</sub>処理開始と同時にD<sub>2</sub>分子は光ファイバの中に飽和状態になるまで拡散しはじめる。そのため、D<sub>2</sub>処理前に比べて、D<sub>2</sub>分子による吸収損失は増大して光ファイバの伝送損失は急激に増大していく。

(2) そして、飽和状態以降では、D<sub>2</sub>の一部は構造欠陥と相互反応して順次OD基として固定されていくので、光ファイバ内のD<sub>2</sub>分子の量は順次減少していき、それに伴って吸収損失も順次減少していく。逆に、OD基の吸収損失による伝送損失は増大していく。

(3) そして、構造欠陥の全てがOD基となった時点以降にあっては、残余のD<sub>2</sub>分子は反応相手が存在しないので、光ファイバの外部へ逃散する。なお、こ

の逃散挙動は、外部から光ファイバ内部への拡散挙動と平衡関係にあると考えられる。

(4) したがって、D 2 処理からある時間が経過すると、D 2 処理された光ファイバの伝送損失が減少に転じたある時点では、構造欠陥のは既にOD基との結合を完了しているので、その時点をもってD 2 処理の終了時点とすることができる。

上記した新たな知見と上記考察に基づいて光ファイバの改良された製造方法が開発された。

具体的には、D 2 処理前後において、波長1383 nmにおける平均伝送損失( $a$  dB/km とする)を測定し、同時に波長1420 nmにおける平均伝送損失( $b$  dB/km とする)を測定し、 $a - b$  のD 2 処理前後の差が0.004 dB/km 以下の値を示す時点をもってD 2 処理の終了時点とした。

ここで、波長1383 nmを選択した理由は、この波長がOH基固有の吸収ピークを示す波長であり、またD 2 処理の影響で損失が変化しにくいからであり、波長1420 nmを選択した理由は、この波長の損失変化からD 2 分子がコアに到達したかどうかを確認できるからである。また、 $a - b$  値を0.01 dB/km 以下とした理由は、D 2 が確実にコアまで入っていることを確認する必要があるからである。

より具体的にいえば、D 2 処理を開始してから、温度25℃で48時間以上放置しておくことにより、上記した $a - b$  値を0.01 dB/km 以上にすることができる。

上記した条件を満足する光ファイバは、条長が10 km 以上である場合において、22 m 長でのカットオフ波長が1300 nm 以下の光ファイバになっている。

なお、D 2 処理後に光ファイバの平均伝送損失を測定するに際しては、当該光ファイバをD 2 処理時におけるD 2 の最高濃度よりも濃度低下している雰囲気例えば300時間以上放置してから測定することが好ましい。前記したD 2 分子の逃散 拡散の平衡関係が逃散側に崩れてD 2 分子は外部へ逃散していくので、光ファイバ内の遊離D 2 分子による吸収損失は、事実上、消失するからである。

以上の説明で明らかなように、本発明によれば、D 2 処理の終了時点を適切に

決定することができる。そして、1400～1550 nmの幅広い波長領域においてもOH基吸収が抑制され、CWDM伝送に使用可能な光ファイバを製造することができる。

また、D<sub>2</sub>処理後の光ファイバの平均伝送損失を測定したときに、その平均伝送損失はD<sub>2</sub>分子の吸収損失に基づくものであるのか、それとも曲げ損失のような他の要因に基づくものであるかの判別も可能になる。

更に別な問題として、高純度シリカを用いて光ファイバを製造した場合であっても、その光ファイバ内には、通常、0.1 ppm 未満程度のOH基が存在するだけであるが、OH基生成の経時変化の問題が生じる。

即ち、線引き後にあってはOH基が少ない光ファイバであっても、それを敷設して実使用していると、環境温度下において、周囲の水素に曝露され、当該水素が光ファイバ内に拡散してOH基を生成し、波長1300 nm～1600 nm、とりわけ波長1380～1600 nmにおける伝送損失が経時的に増加していくことが知られている。この水素の存在によって生ずる伝送損失の経時変化は、通常、「水素経時変化損失」と呼ばれている。

このような水素拡散の影響は、光ファイバを通信ケーブルとして束ねた場合、クラッドを通してさえ観察される。この水素拡散は常温下において、0.01%程度の微量な水素の雰囲気の数日間曝露した場合であっても既に観察されており、例えば、波長1383 nmにおいて0.02 dB/km～0.12 dB/kmの損失が認められている。

ところで、水素は、光ケーブル中に存在する異種金属や周囲の湿気による腐食現象に基づいて発生し、また被覆を構成するシリコン樹脂が加熱されて発生するものと考えられている。そして、海水中や大気中に敷設される光ファイバの場合は、水素経時変化損失がとくに大きいという問題がある。

このような問題に対しては、光ファイバの実使用に先立ち、重水素（D<sub>2</sub>）雰囲気に曝露したのち、例えば大気中に放置するというD<sub>2</sub>処理が提案されている（例えば特開2002-148450号公報を参照）。

この方法、線引き後の光ファイバに存在している構造欠陥やOH基にD<sub>2</sub>を反応させたのち所定時間放置することにより、実使用時におけるOH基の生成要因

を事前に排除して、OH基の生成に基づく伝送損失の増加を防ぐことを目的としている。

しかしながら、上記した特許文献1に記載のD<sub>2</sub>処理の場合、D<sub>2</sub>処理を行う時間が非常に長く、またD<sub>2</sub>処理によって光ファイバ内に拡散してOH基と未反応状態で残留しているD<sub>2</sub>分子を光ファイバ外に逃散させるために放置しておく時間も非常に長いという問題がある。そのため、上記先行技術は、実際の工業的な生産においては生産効率が低く、実用上必ずしも満足のいく方法であるとはいえない。

このため従来のD<sub>2</sub>処理における上記した問題を解決し、D<sub>2</sub>処理を迅速かつ効率的に実施して、伝送特性の長期安定性が確保されている光ファイバを製造する方法の提供が望まれる。

上記した目的を達成するために、本発明においては、線引きしてポビンに巻き取った直後の光ファイバを重水素ガスを含むガス雰囲気中に曝露したのち、前記光ファイバ中の重水素ガスが抜けきらないうちに、引張張力をかけながら前記光ファイバを別のポビンに巻き返すことを特徴とする光ファイバの製造方法が提供される。

そのとき、前記引張張力は、前記光ファイバの伸び値で0.5～2%に相当する引張張力であることが好ましく、また、前記光ファイバの巻き返し時に、前記光ファイバを長手方向に所望の長さに切断して分割することが好ましい。

本発明方法の実施例においては、まず、常法により光ファイバ母材を線引きして被覆した光ファイバをポビンに巻き取ったのち、ただちにD<sub>2</sub>処理が施される。具体的には、密閉容器の中に光ファイバを巻き取った直後のポビンを収納し、そこにD<sub>2</sub>を含むガスを封入し、所定の時間そのままの状態で放置しておくという態様で実施される。

雰囲気ガスとしては、例えば空気または不活性ガス（He, Ar, N<sub>2</sub> など）とD<sub>2</sub>の混合ガスが用いられ、その場合、D<sub>2</sub>を0.01～100%含むガスであることが好ましい。100%近くD<sub>2</sub>を含む混合ガスは、短時間の処理であっても伝送損失の増加を抑制することができ、処理効率の点で好適である。

処理時間は、1時間未満ではD<sub>2</sub>処理の効果は充分に発揮されず、10時間を

超えても効果は飽和に達し、徒に生産効率を下げることになるので、1～10時間程度であればよい。2時間前後であることが好適である。

なお、D2処理時における温度が低すぎるとD2処理の反応は遅くなり、また逆に高すぎると、処理時間を短縮することはできるが、他方では被覆の劣化する虞が生じてくるので、処理時の温度は $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の範囲内で管理することが好ましい。

D2処理後、ただちに、処理された光ファイバは、別のポビンに巻き返される。このとき、光ファイバには引張張力を印加することが必要である。

すなわち、本発明は、従来のように遊離D2分子のガス抜きのためにD2処理後に長時間放置するという工程が省略できることが大きな特徴である。

この巻き返しは、空調管理された大気中においても、また窒素雰囲気中においても実施可能である。

そして、光ファイバに引張張力を印加することにより、被覆に負荷がかかり、その被覆の屈曲と摩擦のエネルギーにより光ファイバ心線（ガラス）の温度がわずかではあれ上昇する。また光ファイバ心線（ガラス）にも引張張力がかかり、その光ファイバ心線の表面におけるD2濃度はゼロまたは非常に低いので、心線内部の残留D2分子は外部に逃散しやすくなり、ガス抜きに要する時間が短縮される。

このときに印加する引張張力は、光ファイバの伸びが0.5～2.5%になるような引張張力に設定される。伸びが0.5%より小さいような張力印加の場合には、上記した効果が得られず、また伸びが2.5%より大きくなるような張力印加の場合は、被覆にダメージが生ずる可能性があるからである。また、この巻き返し時には、例えば出荷時の長さのような所望する長さに光ファイバを切断していくと、新たに切り割り工程を設ける必要がなく、効率的である。

常法により製造された光ファイバ母材を線引きして光ファイバを製造し、これをポビンに巻き取った。この光ファイバの伝送損失スペクトル図の1例を図10に示す。図中、波長1380nm付近に現出しているピークA0は、OH基に起因する伝送損失である。

ついで、ポビンを密閉容器の中に入れ、D2100%、N20%のガスを封入

し、温度 25℃で2時間放置してD2処理を行った。上記条件のD2処理後、72時間放置してから伝送損失を測定した。その結果を図11に示した。図11の伝送損失スペクトル図から明らかなように、波長1420nm付近に新たなピークA1が認められ、また波長1500nm付近にも新たなブロードピークA2が認められる。前者A1は、光ファイバ内に拡散したD2分子それ自体による吸収を原因とする損失の増大であり、後者A2は、D2処理前の構造欠陥に重水素原子Dが結合して形成したOD基による吸収損失に基づくものである。

ついで、ボビンの光ファイバを大気中で別のボビンに巻き返した。このとき、光ファイバには、伸びが1.1%になるような引張張力を印加し、25.26kmごとに切断して分離した。そして、D2処理を開始してからの波長1420nmにおける伝送損失を経時的に測定し、それぞれの時点における測定値からD2処理前の伝送損失（図10の1420nmにおける値）を減算し、その変化量とD2処理後の経過時間との関係を調べ、それを図12の—●—印で示した。

また比較のために、別のボビンへの巻き返しを行うことなく、D2処理後の光ファイバをそのまま大気中に放置し、その場合についても伝送損失の変化量とD2処理後の経過時間との関係を調べた。その結果を図3の—×—印で示した。

図12から明らかなように、実施例方法で製造した光ファイバでは、波長1420nm付近で吸収損失を示す遊離D2分子が、比較例方法で製造した光ファイバの場合に比べて、短時間で逃散していることがわかる。

以上の説明で明らかなように、D2処理によって水素経時変化損失が低下した光ファイバを製造しようとした場合、従来のようにD2処理後に長時間放置しなくても目的を達成することができる。これは、本発明がD2処理後に、ただちに、引張張力を印加しながら切断・分割して巻き返しを行うことがもたらす効果である。

したがって、本発明方法によれば、伝送損失が増大しない光ファイバを短時間で生産することができ、また長時間放置工程が不要となるので、切断・分割した光ファイバを巻き取る多数のボビンを長時間滞留させることも必要でなくなり、D2処理の実用化に貢献することが大である。